



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen:

103 02 374.7

Anmeldetag:

22. Januar 2003

Anmelder/Inhaber:

Siemens Aktiengesellschaft, München/DE

Bezeichnung:

Verfahren zur Erhöhung der Regeldynamik eines
mindestens einer Lose und/oder Elastizität aufwei-
senden Antriebsstranges einer Werkzeug- oder
Produktionsmaschine

IPC:

B 23 Q 5/00

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprüng-
lichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 24. Juli 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ebert'.

Ebert

Beschreibung

Verfahren zur Erhöhung der Regeldynamik eines mindestens einer Lose und/oder Elastizität aufweisenden Antriebsstranges
5 einer Werkzeug- oder Produktionsmaschine

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Erhöhung der Regeldynamik mindestens einer Lose und/oder Elastizität aufweisenden Antriebsstranges einer Werkzeug- oder Produktionsmaschine, wobei die Maschine mindestens einen Regler zur Regelung der Motorgeschwindigkeit des Antriebsstranges aufweist, wobei dem Regler als zu regelnde Größe ein Mischsignal aus der am Motor gemessenen Motorgeschwindigkeit und der nahe der Last des Antriebsstranges gemessenen Lastgeschwindigkeit
10 zugeführt wird.
15

Bei Werkzeugmaschinen, Produktionsmaschinen, wobei unter Produktionsmaschinen auch Roboter zu verstehen sind, werden häufig zwischen dem Antriebsmotor und der anzutreibenden Last, Getriebe und/oder Kupplungen geschaltet. Getriebe und Kupplungen weisen in der Regel ein Getriebespiel bzw. ein Kupplungsspiel auf. Diese erzeugen zwischen Antrieb und Last eine sogenannte Lose. Eine Lose besitzt bezüglich der Regelungstechnik die unerwünschten Eigenschaft, dass der Motor bis zu einem bestimmten Verfahrweg kaum Kraft für die Bewegung aufwenden muss, während ab einem bestimmten Punkt zur Fortführung der Bewegung plötzlich eine gegenüber der Anfangskraft sehr hohe Kraft für die Weiterführung der Verfahrbewegung des Motors benötigt wird.
20
25
30

Eine solche Lose entsteht z.B. bei auf Zahnrädern basierenden Getrieben z.B. dadurch, dass ein Zahn eines ersten Zahnrades genau zwischen zwei Zähnen eines zweiten Zahnrades steht. Im Moment z.B. des Anfahrens benötigt der Antriebsmotor, der auf das erste Zahnrad einwirkt, nur eine sehr geringe Kraft zum Verfahren des ersten Zahnrades. Erst wenn der entsprechende Zahn des ersten Zahnrades an einen Zahn des zweiten mit der
35

Last verbundenen Zahnrades anstößt, benötigt der Motor plötzlich eine hohe Kraft um die Verbahrbewegung weiter durchzuführen zu können.

5 Weiterhin weisen die bei Getrieben und Kupplungen verwendeten mechanischen Bauteile Elastizitäten auf, die insbesondere für dynamische Bewegungsvorgänge keinen direkten proportionalen Bezug von Motorgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit der Last zulassen.

10

Eine Lose und/oder Elastizitäten bedingen somit ein nicht lineares Verhalten der Regelstrecke.

15

In der Technik wurde bisher entweder als Regelgröße eine direkt am Motor gemessene Motorgeschwindigkeit oder die nahe der Last gemessene Lastgeschwindigkeit als Regelgröße einem Geschwindigkeitsregler zur Regelung der Motorgeschwindigkeit zugeführt. Beide Verfahren weisen spezifische Nachteile auf. Infolge der Lose und/oder Elastizitäten stimmt insbesondere bei dynamischen Vorgängen die Motorgeschwindigkeit nicht mit der Lastgeschwindigkeit überein.

20

25

Wenn lediglich die Motorgeschwindigkeit als Regelgröße verwendet wird, tritt das Problem auf, dass die Regelverstärkung des Reglers nicht auf die Gesamtmasse der Regelstrecke, welche sich aus Lastmasse, Motormasse und Getriebemasse zusammensetzt, adaptiert werden kann, da die oben genannten Einzelmassen infolge der Lose bzw. Elastizität als keine steife Gesamtmasse angesehen werden können. Im Hinblick auf eine entsprechende dämpfungsoptimale Einstellung der Regelverstärkung des Reglers ist nur eine geringe Regelverstärkung zulässig, was eine mangelnde Regeldynamik zur Folge hat.

30

35

Wenn als zu regelnde Größe nur die Lastgeschwindigkeit verwendet wird, dann neigt ein solcher Regelkreis insbesondere durch die geringe mechanische Dämpfung der Elektromechnik bei Momentenumkehr und kleinen Momenten durch die Lose

und/oder Elastizitäten bedingt zu Instabilitäten. Der Vorteil eines solchen Regelkonzepts ist die hohe erzielbare Regeldynamik, da die Regelverstärkung des Reglers nun direkt auf die Last adaptiert werden kann. Entsprechend lassen sich hohe Regelverstärkungen realisieren. Ein solches auf die Regelung der Lastgeschwindigkeit basierendes Regelkonzept ist jedoch nur bei hohen Steifigkeiten der mechanischen Komponenten des Antriebssystems realisierbar. Mangels fehlender Steifigkeit und der insbesondere bei Getriebe auftretenden Lose wird ein solches Regelkonzept in der Regel nicht bei einem Antriebssystem eingesetzt, bei denen zwischen Motor und Last ein Getriebe geschaltet ist. Ein solches Regelkonzept wird im allgemeinen bei Antriebssystemen eingesetzt, bei denen der Motor z.B. ein Torque-Motor direkt mit der Welle der Maschine gekoppelt ist. Die erzielbare gute Regeldynamik muss mit einem entsprechend teureren Antriebskonzept erkauft werden.

In dem NC/CNC Handbuch 95/96, Hans B. Kief, Carl Hanser Verlag München Wien, 1995, Seite 189 Bild 1a ist ein Verfahren der Eingangs genannten Art dargestellt, bei dem ganz prinzipiell eine Mischung von zwei Messsignalen innerhalb eines Regelkreises angedeutet ist.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein einfaches Verfahren zur Erhöhung der Regeldynamik mindestens einer Lose und/oder Elastizität aufweisenden Antriebsstranges einer Werkzeug- oder Produktionsmaschine anzugeben.

Diese Aufgabe wird für das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gelöst, dass das Mischsignal derart erzeugt wird, dass die gemessene Motorgeschwindigkeit durch Multiplikation mit einem ersten Faktor und die gemessene Lastgeschwindigkeit durch Multiplikation mit einem zweiten Faktor gewichtet werden und anschließend eine Addition der gewichteten Motorgeschwindigkeit mit der gewichteten Lastgeschwindigkeit erfolgt.

Weiterhin wird diese Aufgabe für das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gelöst, dass das Mischsignal derart erzeugt wird, dass zunächst die gemessene Lastgeschwindigkeit von der gemessenen Motorgeschwindigkeit subtrahiert wird und die solchermaßen berechnete Differenz durch Multiplikation mit einem Parameter α gewichtet wird und anschließend eine Addition der solchermaßen gewichteten Differenz mit der Lastgeschwindigkeit erfolgt.

- 10 Eine vorteilhafte Ausbildung der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass als ersten Faktor, ein Parameter α und als zweiten Faktor die Differenz $1-\alpha$ vorgesehen ist, wobei der Parameter α sich in einem Zahlenbereich zwischen 0 und 1 bewegt. Durch entsprechende Wahl des ersten und zweiten Faktors sowie des Parameters α lässt sich eine besonderes hohe Regeldynamik erzielen.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird im folgenden näher erläutert. Dabei zeigen:

FIG 1 eine erste Ausführungsform und
FIG 2 eine zweite Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens.

25

- Das erfindungsgemäße Verfahren basiert darauf, dass die vom Regler auszuregelnde Regelgröße aus einer Mischung aus der am Motor gemessenen Motorgeschwindigkeit n_{Motor} und der nahe der Last des Antriebsstrangs gemessenen Lastgeschwindigkeit n_{Last} gebildet wird. Durch diese Maßnahme wird die für die erreichbare Regeldynamik entscheidende erste mechanische Resonanz der Regelstrecke angehoben. Bei der Motorgeschwindigkeit n_{Motor} kann es sich z.B. um eine Motordrehzahl als auch um eine Verfahrensgeschwindigkeit des Motors z.B. bei Linearmotoren handeln. Bei der Lastgeschwindigkeit n_{Last} kann es sich z.B. um eine Lastdrehzahl als auch um eine Verfahrensgeschwindigkeit der Last z.B. längs einer Achse der Maschine handeln.

In FIG 1 ist in Form eines Blockschaltbildes ein erstes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt. Ein Motor 2 ist in dem Ausführungsbeispiel über ein Getriebe 3 mechanisch mit einer Last 4 gekoppelt. Der Motor 2, das Getriebe 3 und die Last 4 bilden einen Antriebsstrang 19, welcher gestrichelt gezeichnet angedeutet ist. Ein örtlich nahe dem Motor 2 befindlicher Drehzahlgeber 5 gibt die Motorgeschwindigkeit n_{Motor} an einen Multiplizierer 7 aus. Ein örtlich nahe der Last befindlicher Drehzahlgeber 6 gibt die Lastdrehzahl n_{Last} an einen Multiplizierer 8 aus. Die Motorgeschwindigkeit n_{Motor} wird am Multiplizierer 7 mit einem Parameter α multipliziert und als solchermaßen gewichtete Motordrehzahl 11 an einen Addierer 9 weiter gegeben. Die Lastgeschwindigkeit n_{Last} wird in dem Multiplizierer 8 mit einem zweiten Faktor $1-\alpha$ multipliziert und die solchermaßen gewichtete Lastgeschwindigkeit n_{Last} dem Addierer 9 zugeführt. Im Addierer 9 wird die gewichtete Motorgeschwindigkeit 11 und die gewichtete Lastgeschwindigkeit 12 addiert und solchermaßen als zu regelnde Größe ein Mischsignal n_{Mess} berechnet. Die Differenz aus Mischsignal n_{Mess} und einem Geschwindigkeits-sollwert n_{Soll} wird einem Regler 10 als Eingangsgröße übergeben. Der Regler 10 kann z.B. ein PI-Regler (Proportional-Integral-Regler) sein. Der Regler 10 gibt als Ausgangsgröße ein Stellsignal 16 an einen Leistungssteller 1 aus der über die elektrische Verbindung 17 den Motor 2 steuert bzw. speist.

In FIG 1 wird das Mischsignal n_{Mess} entsprechend der Beziehung

$$n_{Mess} = \alpha \cdot n_{Motor} + (1 - \alpha) \cdot n_{Last} \quad (1)$$

berechnet.

Wie sich aus obiger Beziehung leicht ableiten lässt, geht die in FIG 1 dargestellte Regelstruktur für den Grenzübergang $\alpha=0$ in eine rein lastgeführte Regelstruktur über, während für $\alpha=1$

die Regelstruktur in einen rein vom Motor geführte Regelstruktur übergeht.

Für die Übertragungsfunktion von Motormoment M_M und Lastmoment M_L zum Mischsignal n_{Mess} ergibt sich:

$$n_{Mess} = \frac{\left(1 + s \frac{D}{c} + s^2 \frac{\alpha J_L}{c}\right) M_M + \left(1 + s \frac{D}{c} + s^2 \frac{\alpha J_M}{c}\right) M_L}{s(J_L + J_M) \left(1 + s \frac{D}{c} + s^2 \frac{J_L J_M}{c(J_L + J_M)}\right)} \quad (2)$$

D: mechanische Dämpfung des Antriebstranges

c: Elastizitätsmodul des Antriebstranges

J_M : Motorträgheitsmoment

J_L : Lastträgheitsmoment

s: komplexe Kreisfrequenz ($s = j\omega = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{Drehfrequenz}$)

Durch Nullsetzen des Zählers der Beziehung (2) ergibt sich mit $M_L = 0$ die Tilgerfrequenz f_T der Übertragungsfunktion von Motormoment M_M zu Mischsignal n_{Mess} zu:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\sqrt{\alpha}} \cdot \sqrt{\frac{c}{J_L}} \quad (3)$$

20

Wie sich aus Beziehung (2) und (3) erkennen lässt, ist durch die Mischung der Motorgeschwindigkeit n_{Motor} mit der Lastgeschwindigkeit n_{Last} , als gemeinsam zu regelnde Größe, die Tilgerfrequenz f_T um einen Faktor $1/\sqrt{\alpha}$ gegenüber einer reinen auf die Motordrehzahl als zu regelnde Größe basierende Regelung ($\alpha=1$) erhöht. Der Parameter α ist deshalb vorzugsweise in einem Bereich zwischen 0 und 1 zu wählen. Die mechanische Bandbreite der mechanischen Übertragung von Motorgeschwindigkeit n_{Motor} zum Mischsignal n_{Mess} ist entsprechend erhöht. Hinsichtlich einer dämpfungsoptimalen Einstellung der Regelverstärkung des Reglers 10 kann die Regelverstärkung somit um den Faktor $1/\sqrt{\alpha}$ angehoben werden. Damit wird die Regeldynamik und Störunterdrückung um den Faktor $1/\sqrt{\alpha}$ verbessert.

30

Die Beziehung (1) lässt sich durch mathematisches Umformen in die Form

$$n_{Mess} = n_{Last} + \alpha \cdot (n_{Motor} - n_{Last}) \quad (4)$$

5

bringen.

In FIG 2 ist eine zweite Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens in Form eines Blockschaltbildes dargestellt, wobei FIG 2 mit FIG 1 bis auf die Art und Weise wie die Motor-
10 geschwindigkeit n_{Motor} mit der Lastgeschwindigkeit n_{Last} zu einem Mischsignal n_{Mess} verknüpft wird identisch ist. In FIG 2 wird die Berechnung des Mischsignals n_{Mess} gemäß der Beziehung (4) durchgeführt. Zunächst wird hierzu die Lastgeschwindigkeit
15 n_{Last} von der Motorgeschwindigkeit n_{Motor} mit einem Subtrahierer 13 subtrahiert. Die solchermaßen berechnete Differenz 18 wird durch Multiplikation mit einem Parameter α innerhalb eines Multiplizierers 14 gewichtet. Anschließend wird eine Addition im Addierer 15 der solchermaßen gewichteten Differenz 20 mit der Lastgeschwindigkeit n_{Last} durchgeführt.

Das Mischsignal n_{Mess} von FIG 1 ist somit mit dem Mischsignal n_{Mess} von FIG 2 identisch.

25 Anhand der Beziehung (4) lässt sich noch einmal anschaulich die Wirkung der Mischung auf die zu regelnde Größe n_{Mess} veranschaulichen. Die Wirkung der Lose und/oder der Elastizität des Getriebes 3 bzw. des Antriebsstrangs 19 drückt sich in der Beziehung (4) in Form der mit einem Parameter α bewerteten Differenz von Motorgeschwindigkeit n_{Motor} und Last-
30 geschwindigkeit n_{Last} aus. Dieser Term wird mit der eigentlichen zielführenden Größe nämlich die Lastgeschwindigkeit n_{Last} durch eine Addition vermischt. Durch entsprechende Wahl des Parameters α lässt sich nun die Wirkung des Regelkreises gegen Lose und/oder Elastizitäten einstellen.
35

Selbstverständlich können die in FIG 1 und FIG 2 als diskrete Funktionsblöcke dargestellte Funktionen wie z.B. Regler, Multiplizierer, Subtrahierer oder Addierer auch integraler Bestandteil einer auf einem Mikroprozessorsystem realisierten Regelung sein.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erhöhung der Regeldynamik eines mindestens einer Lose und/oder Elastizität aufweisenden Antriebsstranges
5 (19) einer Werkzeug- oder Produktionsmaschine, wobei die Maschine mindestens einen Regler (10) zur Regelung der Motorgeschwindigkeit des Antriebsstranges (19) aufweist, wobei dem Regler (10) als zu regelnde Größe ein Mischsignal (n_{Mess}) aus
10 der am Motor (2) gemessenen Motorgeschwindigkeit (n_{Motor}) und der nahe der Last (4) des Antriebsstranges (19) gemessenen Lastgeschwindigkeit (n_{Last}) zugeführt wird, d a d u r c h
g e k e n n z e i c h n e t , dass das Mischsignal (n_{Mess})
derart erzeugt wird, dass die gemessene Motorgeschwindigkeit
(n_{Motor}) durch Multiplikation mit einem ersten Faktor (α) und
15 die gemessene Lastgeschwindigkeit durch Multiplikation mit einem zweiten Faktor ($1-\alpha$) gewichtet werden und anschließend eine Addition der gewichteten Motorgeschwindigkeit (11) mit der gewichteten Lastgeschwindigkeit (12) erfolgt.
- 20 2. Verfahren nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass als ersten Faktor, ein Parameter α und als zweiten Faktor die Differenz $1-\alpha$ vorgesehen ist.
3. Verfahren zur Erhöhung der Regeldynamik eines mindestens
25 einer Lose und/oder Elastizität aufweisenden Antriebsstranges (19) einer Werkzeug- oder Produktionsmaschine, wobei die Maschine mindestens einen Regler zur Regelung der Motorgeschwindigkeit des Antriebsstranges (19) aufweist, wobei dem
Regler (10) als zu regelnde Größe ein Mischsignal (n_{Mess}) aus
30 der am Motor (2) gemessenen Motorgeschwindigkeit (n_{Motor}) und der nahe der Last (4) des Antriebsstranges (19) gemessenen Lastgeschwindigkeit (n_{Last}) zugeführt wird, d a d u r c h
g e k e n n z e i c h n e t, dass das Mischsignal (n_{Mess}) derart erzeugt wird, dass zunächst die gemessene Lastgeschwindigkeit
35 (n_{Last}) von der gemessenen Motorgeschwindigkeit (n_{Motor}) subtrahiert wird und die solchermaßen berechnete Differenz (18) durch Multiplikation mit einem Parameter α gewichtet

wird und anschließend eine Addition der solchermaßen gewichteten Differenz (20) mit der Lastgeschwindigkeit (n_{last}) erfolgt.

- 5 4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , dass der Parameter α sich in ei-
nem Zahlenbereich zwischen Null und Eins bewegt.

Zusammenfassung

Verfahren zur Erhöhung der Regeldynamik eines mindestens ei-
ner Lose und/oder Elastizität aufweisenden Antriebsstranges
5 einer Werkzeug- oder Produktionsmaschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erhöhung der Regel-
dynamik eines mindestens einer Lose und/oder Elastizität auf-
weisenden Antriebsstranges (19) einer Werkzeug- oder Produk-
10 tionsmaschine, wobei die Maschine mindestens einen Regler
(10) zur Regelung der Motorgeschwindigkeit des Antriebsstran-
ges (19) aufweist, wobei dem Regler (10) als zu regelnde Grö-
ße ein Mischsignal (n_{Mess}) aus der am Motor gemessenen und ge-
wichteten Motorgeschwindigkeit (n_{Motor}) und der nahe der Last
15 (4) des Antriebsstrangs gemessenen und gewichteten Lastge-
schwindigkeit (n_{Last}) zugeführt wird. Das Verfahren ermöglicht
eine Erhöhung der Regeldynamik einer Lose und/oder Elastizi-
tät aufweisenden Antriebstranges (19) einer Werkzeug- oder
Produktionsmaschine

20

FIG 1

FIG 1

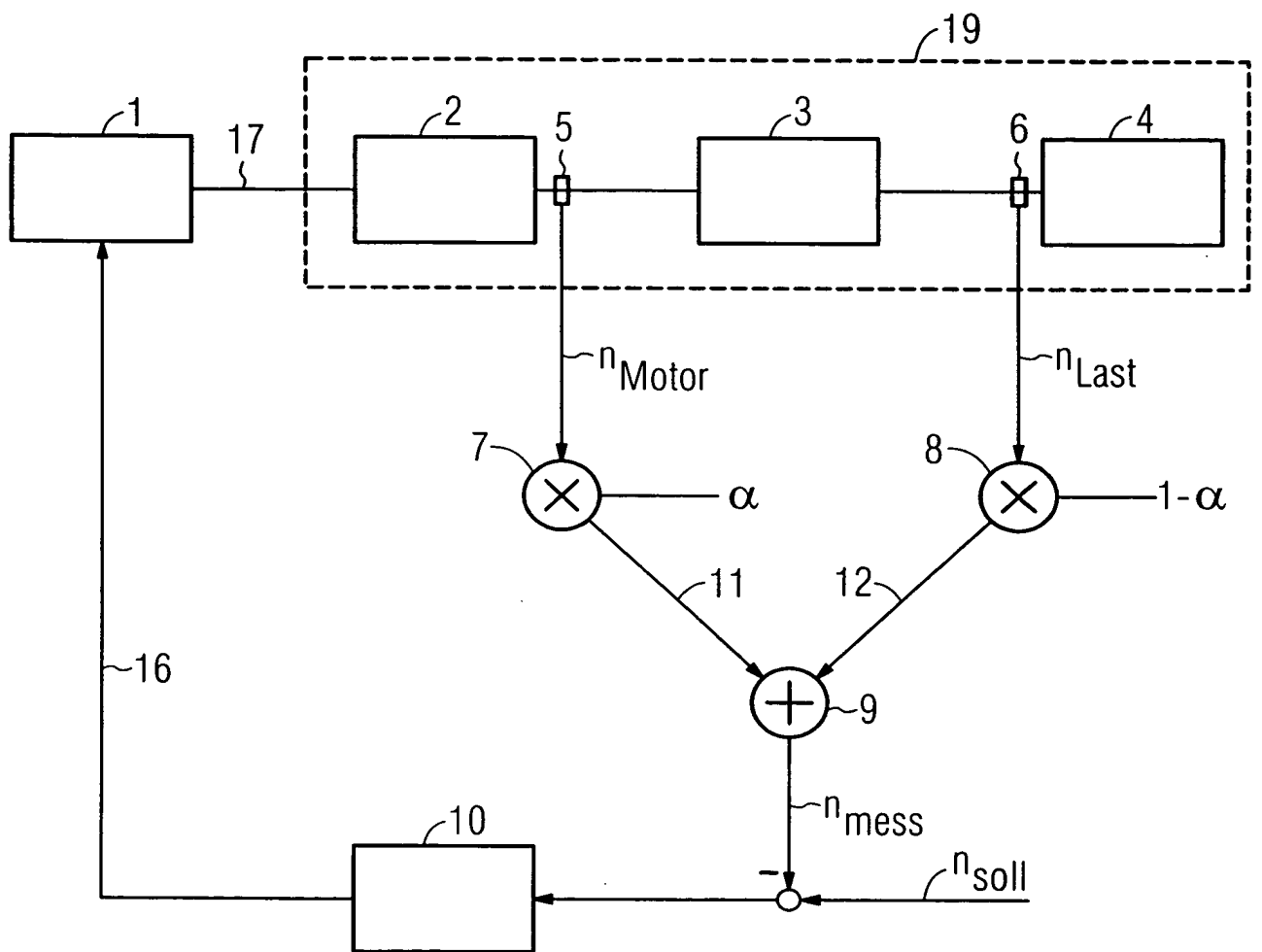


FIG 2

